



KANDIDAATINTYÖ

Pyry Salonpää

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019



KANDIDAATINTYÖ

Rakennusmateriaalien heijastusmittaukset 28 GHz:n taajuusalueella

Pyry Salonpää

Ohjaaja: Joonas Kokkonen

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019

Salonpää P. (2019) Rakennusmateriaalien heijastusmittaukset 28 GHz:n taajuusalueella. Oulun yliopisto, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 27 s.

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkitaan 28 GHz:n signaalin heijastumista kahdeksasta eri rakennusmateriaalista, sekä perehdytään antennien ja sähkömagneettisten aaltojen teoriaan. Tutkittavat rakennusmateriaalit ovat MDF-levy, kattopelti, polykarbonaattilevy, Gyproc-levy, lastulevy, ohut lastulevy, puinen paneeli ja metalliputki. Heijastusta tutkitaan kolmessa eri kulmassa antennien vastaanottamien tehojen avulla. Mittausten avulla materiaaleille määritetään heijastuskertoimet jokaisella eri kulmalla, joilla mittaukset tehtiin. Heijastuskertoimista saadaan tulokseksi MATLAB:illa jokaiselle materiaalille heijastuskertoimen kuvaaja heijastuskulman funktiona. Saadut heijastuskertoimet vaihtelevat arvojen 0,1 ja 0,5 välillä. Laskuissa käytetyissä mittaustuloksissa nähdään kuitenkin virheellistä vaihtelua ja epätarkkuutta, jonka vuoksi työn lopuksi pohditaan mahdollisia syitä mittausten epätarkkuudelle, sekä miten mittausta voitaisiin parantaa luotettavampien tulosten saamiseksi.

Avainsanat: Heijastuskerroin, Heijastusmittaukset, MATLAB, Sähkömagneettiset aallot

Salonpää P. (2019) Reflection measurements of construction materials at the frequency of 28 GHz. Degree Program in Electrical Engineering, University of Oulu, Oulu, Finland. Bachelor's Thesis, 27 p.

ABSTRACT

This thesis studies reflection of a signal at the frequency of 28 GHz from eight different construction materials. Also, the reader is familiarized with the theory related to antennas and electromagnetic waves. The materials being studied are MDF-panel, roofing sheet, polycarbonate panel, chipboard, thin chipboard, wooden panel and metal pipe. The reflection is studied at three different angles by measuring the received power with antennas. The materials' reflection coefficients are calculated by means of the measurement values at the three angles the measurements were done. As a result, graphs are created in MATLAB for all the materials that show the reflection coefficient as function of the reflection angle. The calculated reflection coefficients vary between values 0.1 and 0.5. Some erroneous variation and inaccuracy can be seen in the measurement results used in the calculations. Therefore, possible reasons for the inaccuracy of the measurements are pondered. In addition, there are some thoughts of how the measurement could be improved in order to get more accurate results.

Key words: Electromagnetic waves, MATLAB, Reflection measurements, Reflection coefficient

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ..... | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| SISÄLLYS | 5 |
| LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET | 6 |
| 1. JOHDANTO | 7 |
| 2. TEORIA..... | 8 |
| 2.1 Sähkömagneettinen säteily..... | 8 |
| 2.2 Polarisaatio..... | 8 |
| 2.3 Aaltojen interaktio rajapinnassa..... | 9 |
| 2.3.1 Snellin laki | 10 |
| 2.3.2 Kohtisuora polarisaatio | 10 |
| 2.3.3 Yhdensuuntainen polarisaatio | 11 |
| 2.4 Antennien toiminta..... | 11 |
| 2.5 Vapaan tilan vaimennus | 13 |
| 3. MITTAUKSET | 14 |
| 3.1 Mittausjärjestelmä | 14 |
| 3.2 Heijastusmittaukset | 16 |
| 3.3 Vapaan tilan vaimennuksen mittaukset..... | 17 |
| 3.4 Vastaanottoantennien kulmat | 18 |
| 4. TULOKSET..... | 21 |
| 5. POHDINTA | 25 |
| 6. YHTEENVETO | 26 |
| 7. LÄHTEET | 27 |

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

| | |
|---------------|--|
| GHz | gigahertsi |
| IoT | Internet Of Things, esineiden internet |
| LOS | Line Of Sight, suora näköyhteys |
| ε | permittiivisyys |
| μ | permeabiliteetti |
| σ | johtavuus |
| ρ | heijastuskerroin |
| τ | läpäisykerroin |

1. JOHDANTO

Langattomissa kommunikaatiojärjestelmissä on viime vuosikymmenen aikana tapahtunut erittäin nopeaa kehitystä. Kehitys jatkaa tällä hetkellä edelleen kasvuaan uuteen viidenteen sukupolveen eli 5G:hen. Tämä teknologia tuo mukanaan monia kehittyneitä ominaisuuksia liittyen joustavuuteen ja luotettavuuteen. Nämä ominaisuudet luovat alustan skaalautuvien, turvallisten ja luotettavien esineiden internet (IoT, Internet Of Things) ratkaisujen luomiselle yhteiskunnan hyväksi. Vaikka nykyiset teknologiat kuten 4G LTE ovat jo käytettävissämme, palveluntarjoajien on erittäin vaikea pystyä vastaamaan markkinoiden kokonaisvaltaisiin vaatimuksiin, johtuen mobiililaajakaistan käyttäjien, sekä niiden vaatiman kaistan valtavasta kasvusta. 5G järjestelmien odotetaan tuovan infrastruktuurillaan mukanaan suuren harppauksen teknologiassa. Tämä harppaus tulee nopeuttamaan laitteiden älykkyyden ja liitettävyyden kasvua. [1]

5G:n tavoitteet, kuten suuri tiedonsiirron nopeus ja kyky käsitellä suuria liikennemääriä, ovat johtaneet siirtymiseen korkeammille tiedonsiirtoon käytettävillä taajuuksille. Mikroaallot, jotka kattavat taajuudet kolmesta gigahertsistä kolmeen kymmeneen gigahertsiiin, mahdollistavat näihin tavoitteisiin pääsemisen. Tätä selittää osaltaan se, että kyseisillä taajuuksilla on vähän muita käyttäjiä, sekä se että mitä korkeammille taajuuksille mennään, sen enemmän on kaistanleveyttä käytettävissä. [2]

Langattomaan tiedonsiirtoon käytettävien sähkömagneettisten aaltojen käyttäytyminen radiokanavassa on riippuvainen aallon taajuudesta. Tämän vuoksi täytyy määritellä, miten erilaiset materiaalit vaikuttavat sähkömagneettisiin aaltoihin juuri kyseisellä käytettävällä taajuudella. Tämä tieto on erityisen tärkeää, kun langatonta verkkoa suunnitellaan tiloihin, missä on paljon esteitä, joista signaalit heijastuvat ja joiden läpi signaalit kulkevat. Näiden ominaisuuksien kuvaamiseen tarvittavat parametrit ovat materiaalien läpäisy- ja heijastuskertoimet. Ne kertovat kuinka suuri osa aallon energiasta läpäisee materiaalin ja kuinka suuri osa heijastuu. Tämän vuoksi tässä työssä määritetään kahdeksan eri rakennusmateriaalin heijastuskertoimet 28 GHz:n taajuudella, joka on yksi yleinen taajuus, jolla 5G tulee toimimaan.

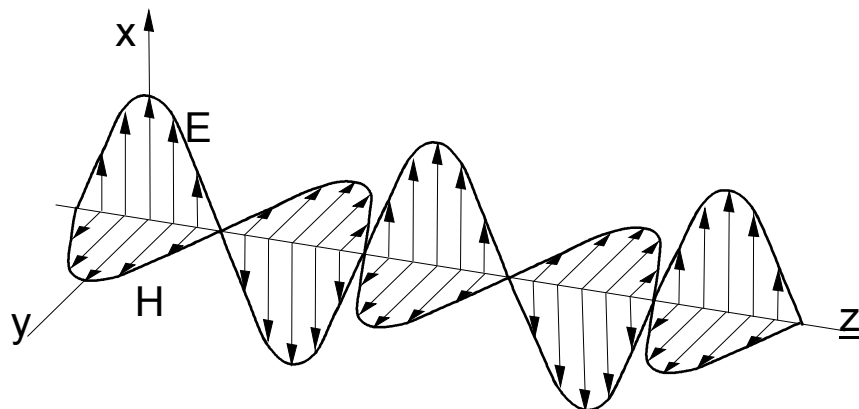
2. TEORIA

2.1 Sähkömagneettinen säteily

James Clerk Maxwell muodosti vuonna 1864 sähkömagneettisen etenemisen teorian. Tällä teorialla hän ennusti radioaaltojen olemassaolon. Myöhemmin vuonna 1887 Heinrich Hertz osoitti radioaaltojen olemassaolon käytännössä, rakentamalla ensimmäisen radiojärjestelmän, joka koostui lähettimestä ja vastaanottimesta. [3].

Nykyään sähkömagneettista säteilyä käytetään viestintäjärjestelmissä siirtämään informaatiota paikasta toiseen. Tämä säteily on energiaa, joka etenee poikittaisena aaltoliikkeenä väliaineen läpi. Sähkömagneettista säteilyä syntyy, kun sähköisen varauksen nopeus muuttuu [3]. Tämä aiheuttaa muuttuvan magneettikentän, joka taas synnyttää muuttuvan sähkökentän. Sähkömagneettinen säteily on siis sähkökentän ja magneettikentän voimakkuuden vaihtelua. Sähkökenttä ja magneettikenttä vaihtelevat kohtisuorassa toisiaan ja etenemissuuntaa vastaan. Sähkömagneettisen aallon etenemistä on havainnollistettu kuvassa 1. [4].

Sähkömagneettisen aallon ominaisuuksiin vaikuttavat värähtelyn taajuus, sekä sen aineen sähköiset ja magneettiset ominaisuudet, jossa sähkömagneettinen aalto kulkee. tällaisia väliaineelle ominaisia parametrejä, jotka vaikuttavat sähkömagneettisten aaltojen käyttäytymiseen, ovat väliaineen permittiivisyys (ϵ), permeabiliteetti (μ) ja johtavuus (σ) [4].



Kuva 1. Z-akselin suuntaan kulkeva sähkömagneettinen aalto. E kuvaa sähkökenttä vektoreita ja H magneettikenttä vektoreita [2].

2.2 Polarisaatio

Sähkömagneettisen aallon polarisaatio on ominaisuus, joka kertoo aallon sähkökenttävektorin aikatasossa vaihtelevan suunnan ja amplitudin. [4] Sähkökentän voidaan ajatella koostuvan kahdesta pallokoordinaatti komponentista E_1 ja E_2 . Se voidaan kuvata matemaattisesti:

$$\vec{E} = (E_1 \vec{u}_x + E_2 \vec{u}_y) e^{-jkz} \quad (1)$$

Kaavassa \vec{u}_x ja \vec{u}_y ovat x- ja y-akselin suuntaiset suuntavektorit.

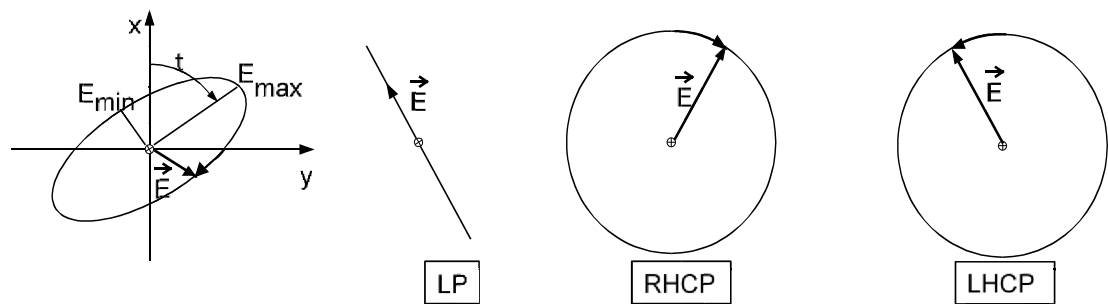
Sähkömagneettista aaltoa kutsutaan elliptisesti polarisoituneeksi, jos sähkökenttävektori pyörii ajan ja paikan funktiona kohtisuorassa kentän

etenemissuuntaa vastaan, sekä sähkökenttävektorin amplitudi vaihtelee x-y-tasossa. Silloin sähkökenttävektori muodostaa ellipsin ajan funktiona. Polarisaatioellipsiä kuvataan akseli suhteella E_{\max}/E_{\min} ja kallistuskulmalla τ . [4]

Jos sähkökenttävektori pyörii mutta sen amplitudi pysyy vakiona, aaltoa kutsutaan ympyräpolarisoituneeksi, eli sähkökenttävektori muodostaa ympyrän ajan funktiona. [4]

Kolmas mahdollinen polarisaation muoto on lineaaripolarisaatio. Siinä sähkökenttävektori ei pyöri. Tämän sijaan sähkökenttävektori värähtelee, eli sen suunta vaihtelee vain yhdessä ulottuvuudessa.

Elliptiset- ja ympyräpolarisaatiot voidaan jakaa sähkökentän vektorin pyörimissuunnan mukaan. Jos sähkökentän vektori pyörii myötäpäivään etenemissuuntaan katsottaessa, aalto on oikeakätisesti polarisoitunut. Jos taas vektori pyörii vastapäivään, aalto on vasenkätisesti polarisoitunut. [4] Alla olevassa kuvassa 2 on havainnollistettu erilaisia polarisaatio tyyppejä.



Kuva 2. Elliptinen polarisaatio, lineaaripolarisaatio, oikeakätinen ympyräpolarisaatio ja vasenkätinen ympyräpolarisaatio [2, s. 30].

2.3 Aaltojen interaktio rajapinnassa

Tarkastellaan kuvassa 3 näkyvää tilannetta, missä väliaineessa kulkeva tasoaalto \vec{k}_1 kohtaa toisen väliaineen, jolla on eri permittiivisyys ja permeabiliteetti kuin ensimmäisellä väliaineella. Tässä tilanteessa osa aallosta heijastuu ja osa läpäisee rajapinnan. Heijastusta kuvataan heijastuskertoimella, joka kertoo, kuinka paljon aallon energiasta heijastuu. Sen määritelmä on:

$$\rho = \frac{E'_1}{E_1} \quad (2)$$

Kaavassa E'_1 on heijastuvan aallon sähkökentän amplitudi ja E_1 tulevan aallon sähkökentän amplitudi. [4]

Läpäisyä kuvataan läpäisykertoimella, joka kertoo, kuinka suuri osa aallon energiasta läpäisee rajapinnan. Sen määritelmä on:

$$\tau = \frac{E_2}{E_1} \quad (3)$$

Kaavassa E_2 on läpäisevän aallon sähkökentän amplitudi ja E_1 tulevan aallon sähkökentän amplitudi. [4]

2.3.1 Snellin laki

Snellin lakia käytetään kuvaamaan tulokulman ja heijastuskulman välistä suhdetta, kun aalto kulkee kahden erilaisen isotrooppisen väliaineen rajapinnan läpi. Tällaisia aineita voi olla esimerkiksi vesi, lasi tai ilma. Snellin laki määrää että:

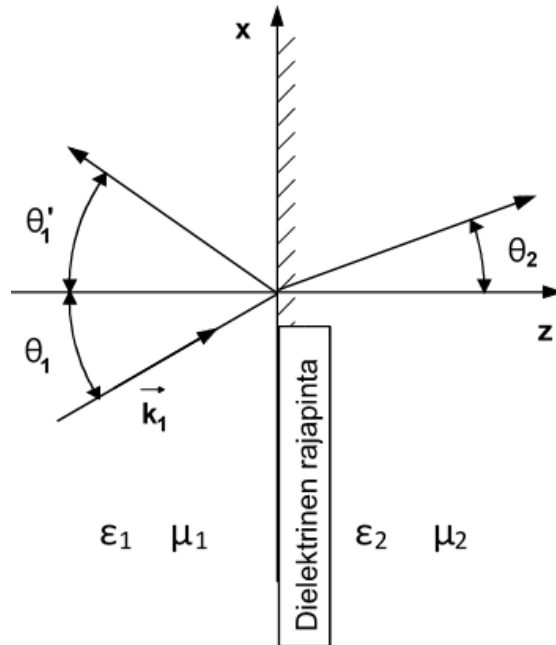
$$\theta_1 = \theta'_1 \quad (4)$$

ja

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}} \quad (5)$$

Kaavoissa jokainen θ on kuvassa 3 näkyvä rajapinnan normaalin ja aallon suuntavektorin välinen kulma. [4]

Snellin laki pätee, sekä yhdensuuntaisessa että kohtisuorassa polarisaatiossa, joita tarkastellaan seuraavassa kappaleessa.



Kuva 3. Tulevat, heijastuvat ja läpäisevät aallot.

2.3.2 Kohtisuora polarisaatio

Kohtisuorassa polarisaatiossa sähkökenttä on kohtisuorassa tulotasoon, joka on taso, jonka muodostavat tulevan aallon suunta ja rajapinnan normaali. Kuvassa 3 tämä olisi paperin taso. Kohtisuorassa polarisaatiossa heijastuskertoimen on. [2]

$$\rho_{\perp} = \frac{\cos(\theta_1) - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_1}}{\cos(\theta_1) + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_1}} \quad (6)$$

Ja läpäisykerroin on. [2]

$$\tau_{\perp} = \frac{2 \cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_1}} \quad (7)$$

2.3.3 Yhdensuuntainen polarisaatio

Yhdensuuntaisessa polarisaatiossa sähkökenttä on yhdensuuntainen, eli samassa tasossa tulotason kanssa. Nyt heijastuskerroin on. [2]

$$\rho_1 = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_1} - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cos \theta_1}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_1} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cos \theta_1} \quad (8)$$

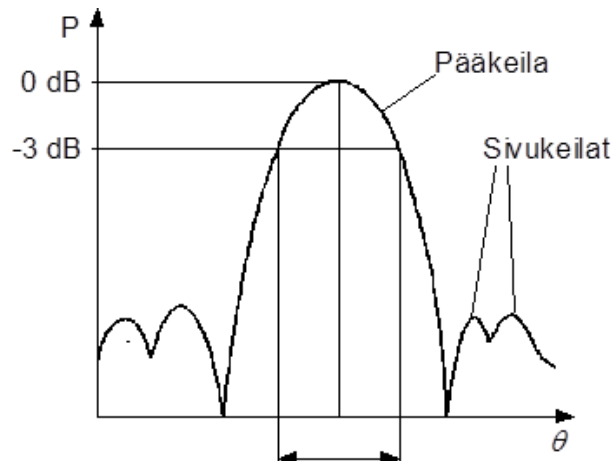
ja läpäisykerroin on

$$\tau = \frac{2 \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos \theta_1}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \sin^2 \theta_1} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cos \theta_1} \quad (9)$$

2.4 Antennien toiminta

Antenni on laite, jolla voidaan lähettää tai vastaanottaa sähkömagneettisia aaltoja. Antennit ovat resiprookkisia laitteita, eli niillä on samat ominaisuudet, sekä lähetyksessä että vastaanotossa. Lähettävä antenni muuttaa sähkövirtaa sähkömagneettisiksi aalloiksi. Vastaanottava antenni toimii päinvastoin, eli se muuttaa sähkömagneettiset aallot sähkövirraksi. Antenni siis luo siirtymän radioaallolle ohjatusta tilasta vapaaseen tilaan tai päinvastoin. [5]

Antennin säteilemä teho riippuu tarkastelukulmasta, eli se ei säteile yhtä vahvasti jokaiseen suuntaan. Samalla tavoin antennin vastaanottama teho riippuu kulmasta, missä signaali saapuu antenniin. Kuvassa 4 näkyvä antennin suuntakuvio kuvaa tätä ominaisuutta suuntakulman θ suhteen. Se on graafinen esitys lähetinantennin säteilemän energian tehotiheydestä kulman funktiona, tai vastaanottoantennin vastaanotetun energian tehotiheydestä kulman funktiona. Antennin suuntakuviossa nähdään yleensä pääkeila, joka kertoo mihin suuntaan suurin osa antennin säteilevästä tehosta menee. Pääkeilan ulkopuolella teho yleensä vaihtelee ja tämä näkyy suuntakuviossa sivukeiloina. [6]



Kuva 4. Antennin suuntakuvio.

Antennilla on kompleksinen impedanssi, jonka reaali-osa on antennin säteilyresistanssin ja häviöresistanssin summa. Imaginaariosan muodostaa antennin reaktanssi. [6]

Yksi antennia kuvaava suure on suuntaavuus D , joka on antennin säteilemän maksimitehotiheyden suhde keskimääräiseen tehotiheyteen. [6]

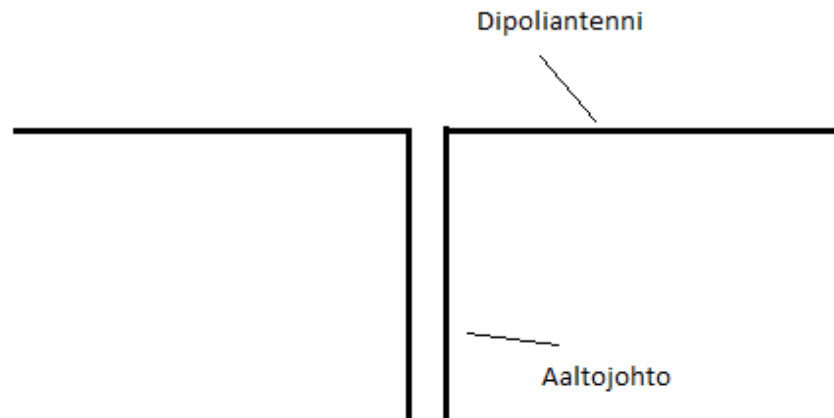
Eräs toinen antennin ominaisuus on sen vahvistus G , joka kuvaa kuinka hyvin lähettävä antenni muuttaa syötettyä tehoa radioaalloiksi johonkin tiettyyn suuntaan ja kuinka hyvin vastaanottava antenni muuttaa tietystä suunnasta radioaallot vastaanotetuksi tehoksi.

Antennin sieppauspintaa eli antennin tasoaallosta vastaanottamaa tehoa kuvaava suure on antennin efektiivinen pinta-ala

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (10)$$

Kaavassa λ on aallonpituus ja G antennin vahvistus. Antennilla on myös polarisaatio, joka kertoo antennin säteilemän sähkömagneettisen aallon polarisaation. [6]

Antenneja on monenlaisia eri tyyppejä. Yksi yleinen antennityyppi on kuvassa 5 näkyvä dipoliantenni. Se on yksinkertainen suora johdin, joka on katkaistu niin että siihen voidaan syöttää vaihtovirtaa aaltojohdosta. [6]



Kuva 5. Dipoliantenni

Toinen yleinen antennityyppi on monopoli-antenni. Se on jonkun johtavan tason, kuten maatasen yläpuolella oleva johdin. Sen säteily vastaa dipolin säteilyä johtavan tason yläpuolella. Sillä on dipoliin verrattuna kaksinkertainen tehotiheys samalla syöttöteholla, kaksinkertainen vahvistus, sekä sen impedanssi on puolet vastaavasta dipoliantennista. [6]

2.5 Vapaan tilan vaimennus

Tarkastellaan ilmassa kulkevaa radioaaltoa, joka vastaanotetaan etäisyydellä d lähettinantennista. Oletetaan että lähettimen ja vastaanottimen välillä ei ole esteitä, ja että signaali etenee suoraviivaisesti niiden välillä. Tällaiseen siirtolinjaan liittyvän radiokanavan mallia kutsutaan line-of-sight (LOS) kanavaksi ja siihen liittyvää vastaanotettua signaalia kutsutaan LOS signaaliksi.

Kun tasoaalto osuu vastaanottoantenniin, se sieppaa tasoaallosta tehon:

$$P_r = \frac{C^2}{(4\pi df)^2} G_{rx} G_{tx} P_t \quad (11)$$

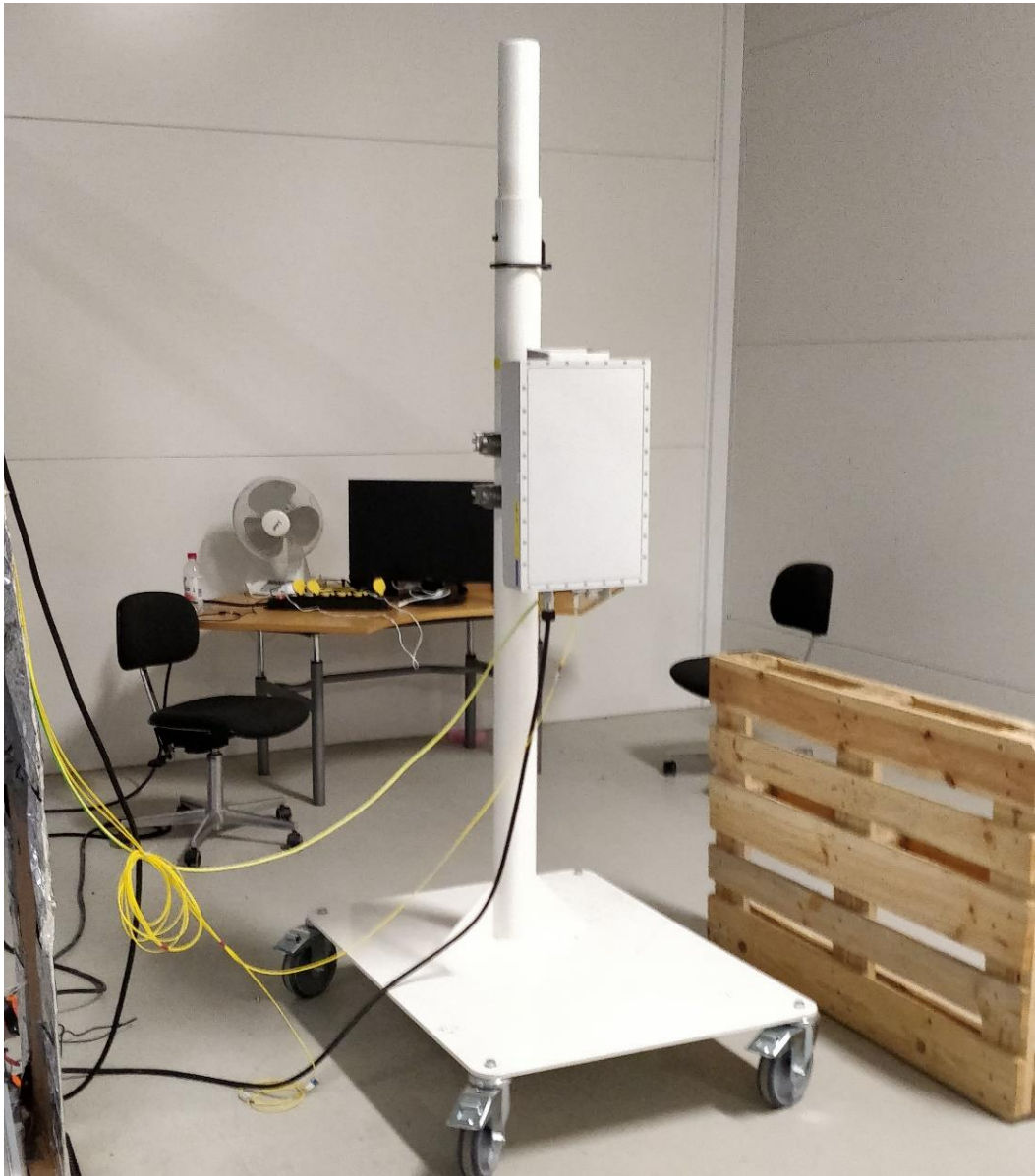
Kaavassa C on valonnopeus, f signaalin taajuus, d etäisyys lähettinantennista, G_{rx} vastaanottoantennin vahvistus, G_{tx} lähetysantennin vahvistus ja P_t lähetysteho. Kaavan mukaan vastaanotetun signaalin teho on kääntäen verrannollinen lähettimen ja vastaanottimen etäisyyden neliöön. Tämän vaimennuksen aiheuttaa lähetetyn signaalin tehosiheyden pieneneminen. Mitä kauempana lähetysantennista ollaan, sitä laajemmalle pinta-alalle signaalin teho on levinnyt. [6]

3. MITTAUKSET

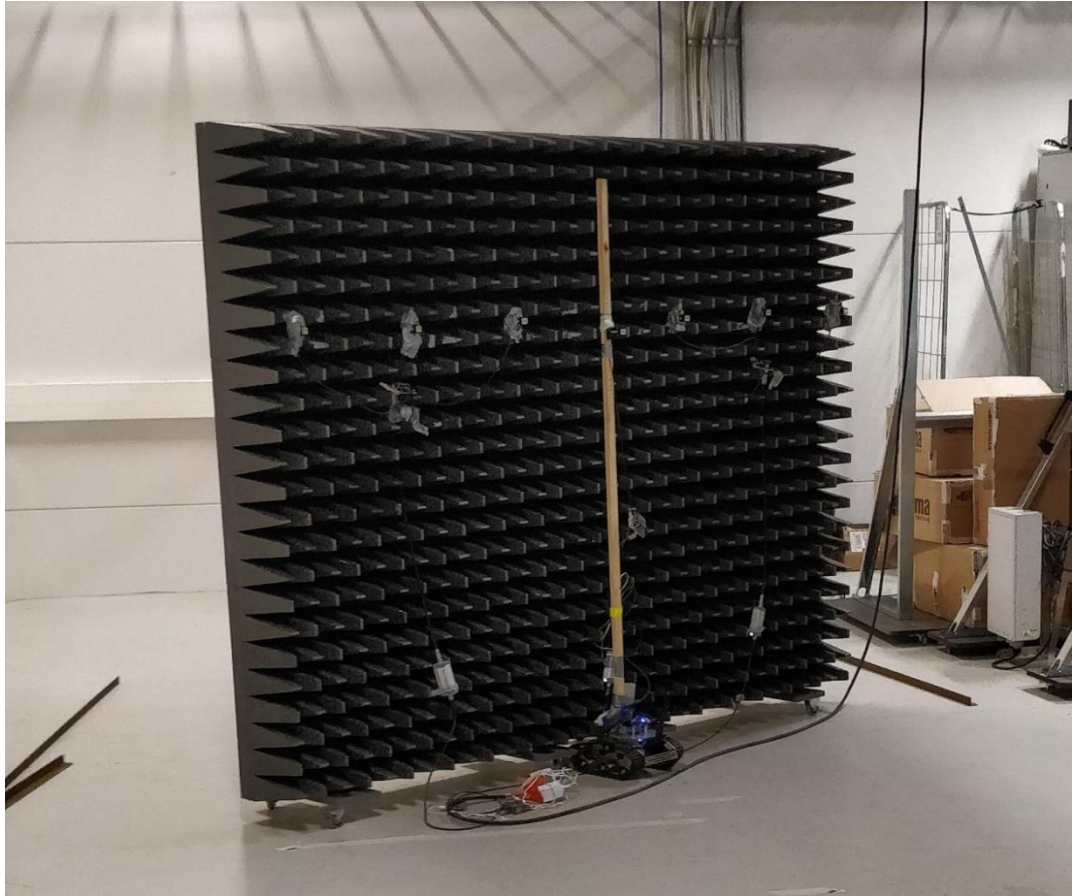
3.1. Mittausjärjestelmä

Nämä mittaukset on tehty yhteistyössä Nokia Oyj:n kanssa ja suoritettu heidän tiloissaan, Oulussa Ruskossa, Otava-laboratoriossa.

Mittausten tarkoituksena oli selvittää seitsemän eri rakennusmateriaalin heijastuskertoimet heijastuskulman funktiona. Kertoimien selvittämiseen käytössä oli kuvassa kuusi näkyvä AirScale 28 GHz Radio Unit (AEUA) Band 30 lähetysantenni, sekä seitsemän Rohde&Schwarz R&S®NRPM-A90 vastaanottoantennia. Kuusi näistä vastaanottavista antenneista oli kiinnitetty liikuteltaviin vaimennusseiniin tietyn matkan päähän toisistaan. Yksi vastaanottoantenni oli irrallinen ja kiinnitettynä radio-ohjauksella liikutettavaan alustaan. Nämä antennit näkyvät kuvassa seitsemän, missä erillinen antenni asetettu keskimmäiseksi.

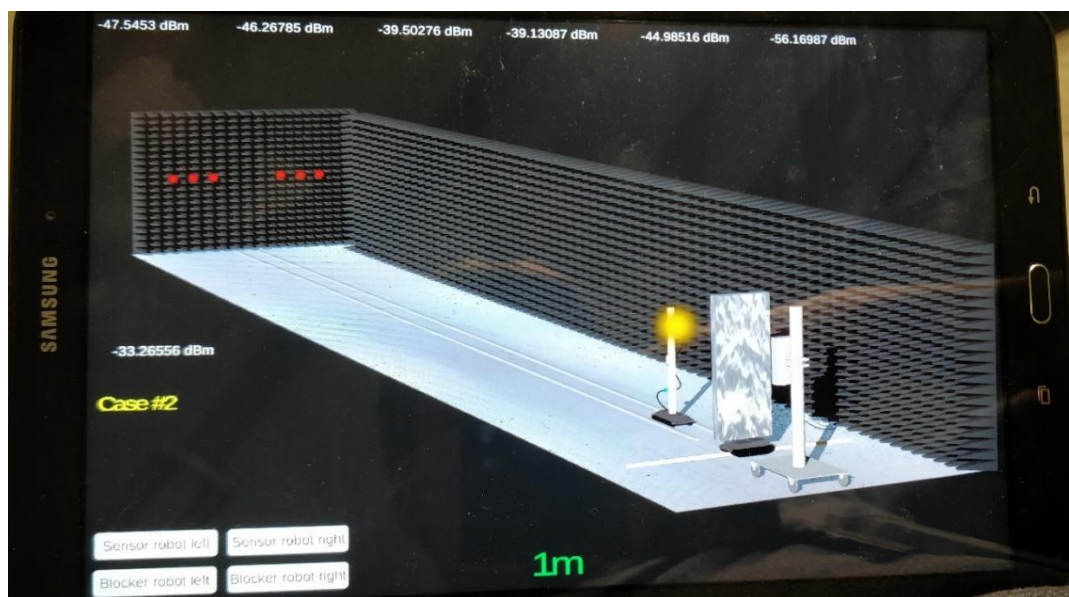


Kuva 6. Lähetysantenni.



Kuva 7. Vastaanottoantennit heijastusmittauksia varten.

Vastaanottoantenneista tuleva data ohjataan Raspberry Pi:hin, joka lähettää sen langattomasti tablettiin. Tabletissa oleva sovellus käsittelee datan ja esittää sen käyttäjälle graafisesti, kuvassa kahdeksan nähtävällä tavalla. Näytön yläreunassa näkyvät seiniin kiinnitettyjen antennien tehoarvot yksikössä dBm ja vasemmassa reunassa irrallisen antennin tehoarvo yksikössä dBm.

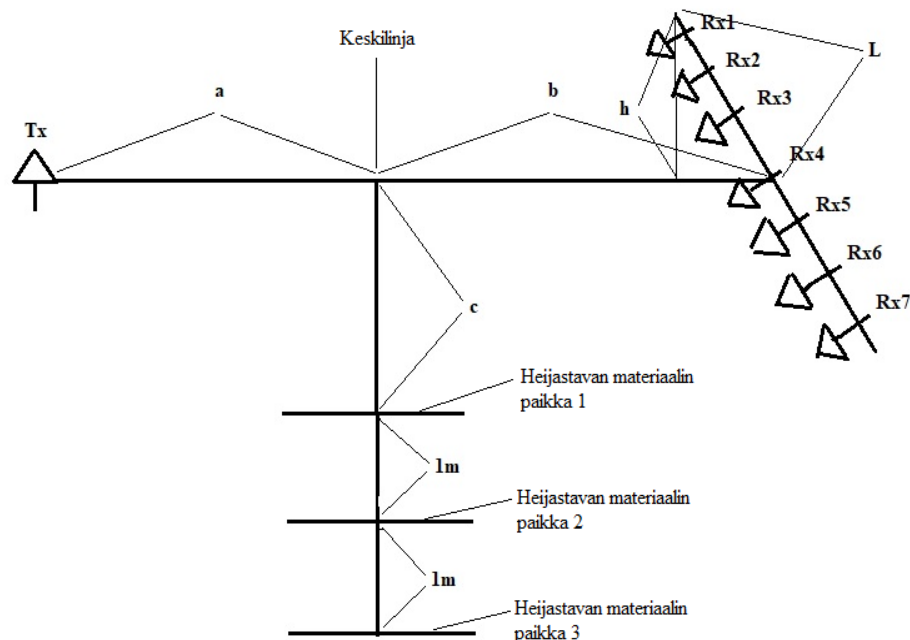


Kuva 8. Tabletin käyttöliittymä

3.2. Heijastusmittaukset

Kaavan 2.2 mukaan heijastuskerroin on heijastuvan aallon sähkökentän amplitudin suhde tulevan aallon sähkökentän amplitudiin. Koska amplitudi on suoraan verrannollinen aallon tehoon, saadaan sama tulos käyttämällä heijastuneen aallon tehon suhdetta tulevan aallon tehoon.

Heijastuneen aallon teho määritettiin heijastusmittauksilla, jotka toteutettiin kuvassa yhdeksän näkyvällä asetelmalla. Kuvan seitsemän liikuteltavat vaimennusseinät asetettiin noin viiden metrin etäisyydelle lähetinantennista ja sellaiseen kulmaan että heijastuva signaali osuisi mahdollisimman pienessä kulmassa seinissä kiinnioleviin vastaanottoantenneihin. Tutkittava materiaali asetettiin liikuteltavan lavan päälle. Lähetysantenni suunnattiin käsin jokaisen mittauksen yhteydessä osoittamaan kohti heijastavaa materiaalia, jotta lähetysantennin pääkeila osuisi keskelle tutkittavaa materiaalia. Näiden asettelujen jälkeen vastaanottoantennien (Rx) teholukemat otettiin ylös. Mittaus toistettiin jokaiselle tutkittavalle materiaalille kolmella eri etäisyydellä antennien väliseltä keskilinjalta, jotta heijastuskerroin voitaisiin laskea kolmella eri signaalin heijastuskulmalla.



Kuva 9. Heijastusmittausten asetelma.

Signaalin kulkema matka riippuu tarkasteltavan vastaanottoantennin paikasta ja tarkasteltavan heijastuspinnan etäisyydestä. Signaalin kulkeman matkan määrittämistä varten mittausasetelman dimensiot mitattiin mittanauhalla. Dimensiot ovat listattuna alapuolella olevassa taulukossa yksi.

Taulukko 1. Heijastusmittausjärjestelmän dimensiot.

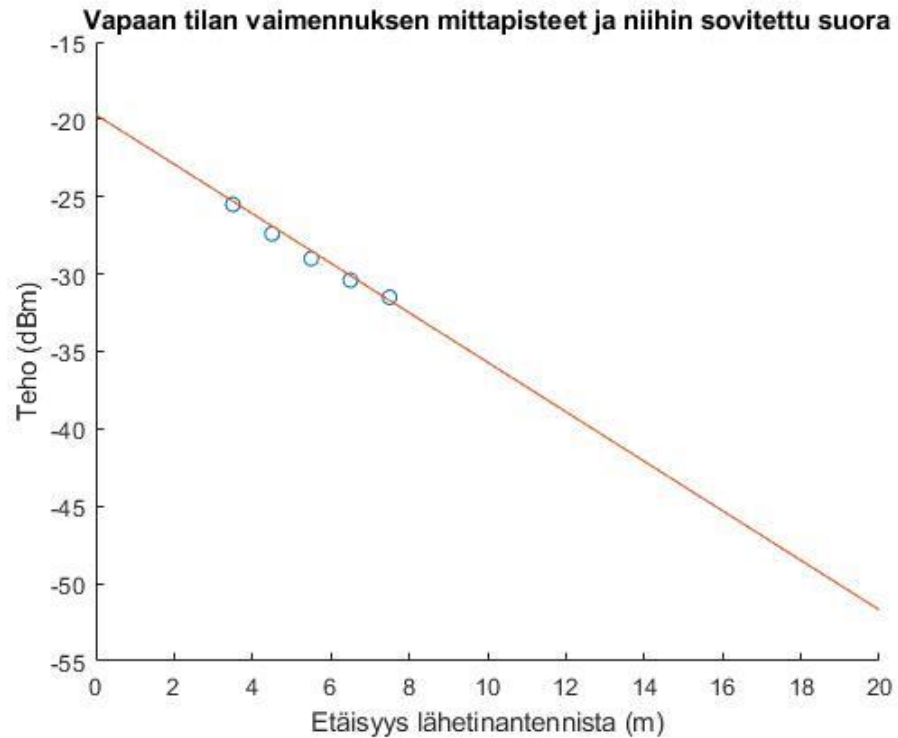
| |
|----------------------|
| $a = 235 \text{ cm}$ |
| $b = 252 \text{ cm}$ |
| $c = 197 \text{ cm}$ |
| $L = 114 \text{ cm}$ |
| $h = 105 \text{ cm}$ |

Määritellään signaalin kulkemaksi matkaksi $r_1 + r_2$, missä r_1 on lähetinantennin ja heijastavan pinnan välinen etäisyys ja r_2 on heijastavan pinnan ja vastaanottoantennin välinen etäisyys. Trigonometriallla saadaan että $r_1 = \sqrt{c_x^2 + a^2}$, missä c_x on heijastavan materiaalin paikan etäisyys antennien väliseltä keskilinjalta, ja a on kuvassa 10 näkyvä vastaavasti nimetty dimensio. $r_2 = \sqrt{\left(b - \sqrt{d_x^2 - h^2}\right)^2 + (c_x + h)^2}$, missä b ja h ovat kuvassa 10 näkyvät vastaavat dimensiot, ja d_x on tarkasteltavan vastaanottoantennin etäisyys keskilinjasta liikuteltavaa seinää pitkin. Nämä matkat laskettiin MATLAB:illa jokaiselle vastaanottoantennille.

3.3. Vapaan tilan vaimennuksen mittaukset

Heijastusmittauksella saadussa vastaanotetussa tehossa on mukana vapaan tilan vaimennus, jonka suuruus riippuu kaavan (11) mukaan signaalin kulkemasta matkasta. Heijastuskerrointa laskettaessa myös tulevan aallon tehossa täytyy olla yhtä suuri vapaan tilan vaimennus, jotta vapaan tilan vaimennuksen vaikutus saadaan mitätöityä. Tämän vuoksi vastaanotetun tehon P_r riippuvuus etäisyydestä selvitettiin mittaamalla. Irrallinen vastaanottoantenni ja lähetinantenni asetettiin osoittamaan kohti toisiaan. Vastaanottoantennin teholukema otettiin ylös viidellä eri etäisyydellä lähetinantennista.

Pienten mittausetäisyyksien takia mittapisteisiin sovitettiin suora. Suoran avulla saadaan approksimoitua vapaan tilan vaimennusta suuremmilla etäisyyksillä lähetinantennista, kuin mittauksia oli tehty. Mittauspisteet ja niihin sovitettu suora näkyvät kuvassa yhdeksän. Kuvaajasta nähdään, että vaimennus noudattaa aiemmin määriteltyä vapaan tilan vaimennuksen kaavaa (11).



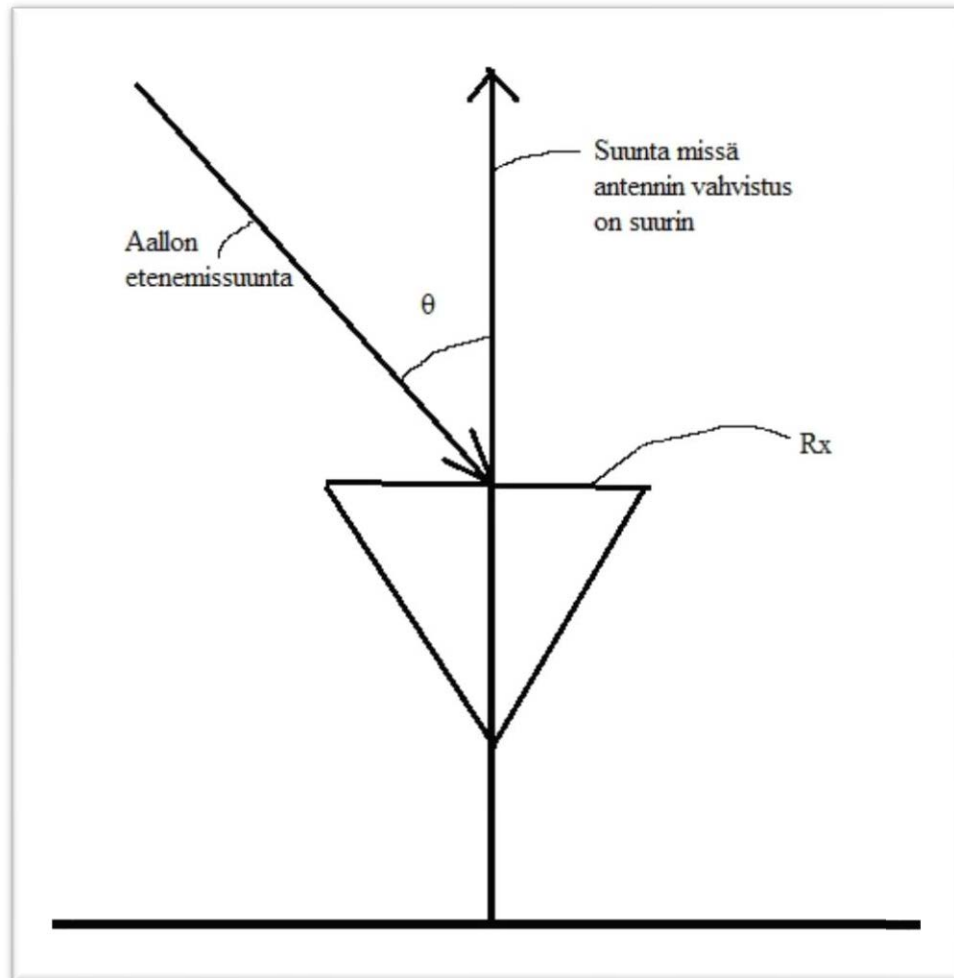
Kuva 10. Vapaan tilan vaimennuksen mittapisteet ja niihin sovitettu suora.

3.4. Vastaanottoantennien kulmat

Aiemmin kappaleessa 2.4 todettiin, että antennin vastaanottama teho riippuu suuntakulmasta. Heijastusmittauksissa jokainen vastaanottoantenni on eri kulmassa suhteessa saapuvaan heijastuneeseen signaaliin. Tämä on kuvassa 11 näkyvä kulma θ . Kulman vaikutus täytyy mitätöidä, jotta heijastuskerrointa laskettaessa, heijastuneen aallon teho olisi verrattavissa vapaantilan mittauksissa saatuun tulevan aallon tehoon. Mitätöimiseksi vastaanottoantennin suuntakuviot ja jokaisen antennin suuntakulma täytyi määritellä.

Heijastusmittausjärjestelmän dimensioiden ja trigonometrian avulla saadaan, että kulma $\theta = \left| 90^\circ - \left(90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{h}{L} \right) \right) - \tan^{-1} \left(\frac{b - \sqrt{d_x^2 - h_x^2}}{c_x + h_x} \right) \right|$, missä h , L , ja b ovat

vastaavasti nimetyt kuvassa yhdeksän näkyvät heijastusmittausjärjestelmän dimensioidet. d_x on tarkasteltavan antennin etäisyys keskilinjasta liikuteltavaa seinää pitkin. h_x on tarkasteltavan antennin suora etäisyys keskilinjasta. c_x on heijastavan materiaalin paikan etäisyys antennien väliseltä keskilinjalta. Kaavalla MATLAB:issa lasketut kulmat eri etäisyyksillä on listattu taulukossa kaksi.

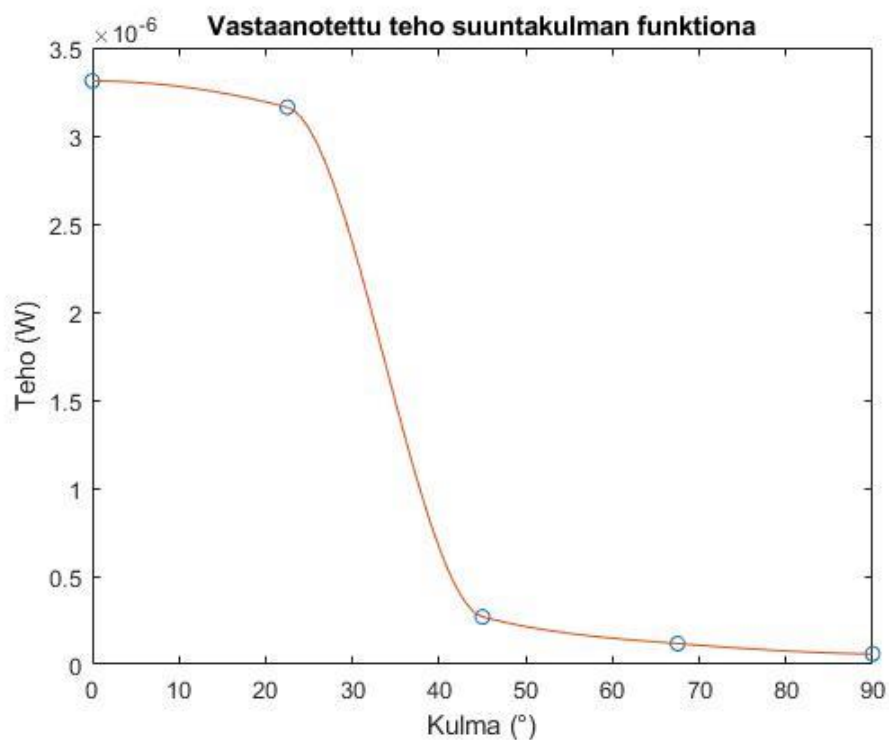


Kuva 11. Antennin kulma suhteessa tulevan aallon etenemissuuntaan.

Taulukko 2. Antennien suuntakulmat eri etäisyyksillä keskilinjasta.

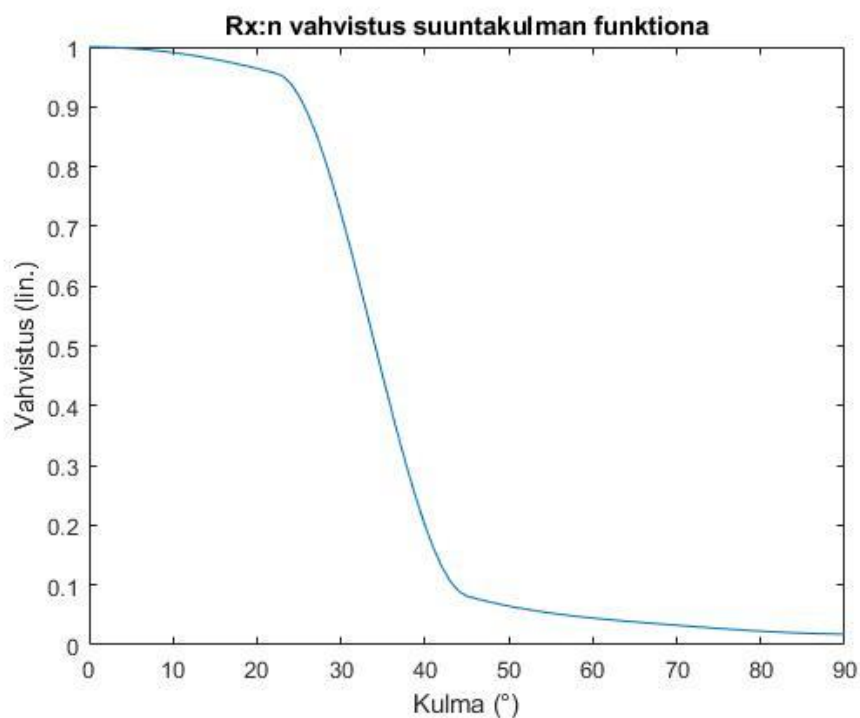
| | Kulma θ , etäisyydellä c1 keskilinjasta | Kulma θ , etäisyydellä c2 keskilinjasta | Kulma θ , etäisyydellä c3 keskilinjasta |
|-----|--|--|--|
| Rx1 | 31° | 39° | 44° |
| Rx2 | 26° | 35° | 41° |
| Rx3 | 20° | 31° | 38° |
| Rx4 | 15° | 27° | 35° |
| Rx5 | 10° | 23° | 32° |
| Rx6 | 3° | 17° | 27° |
| Rx7 | 4° | 11° | 23° |

Suuntakuvion määrittäminen tehtiin mittaamalla. Mittaukset toteutettiin käytössä olevalla irrallisella vastaanottoantennilla. Antenni asetettiin kohti lähetysantennia ja vastaanotettu teho otettiin ylös antennia kääntämällä neljässä eri kulmassa. Saaduista mittapisteistä saatiin MATLAB:issa wateiksi muuttamalla ja interpoloimalla kuvassa 12 näkyvä käyrä, jolla approksimoidaan antennin vastaanottokulmasta riippuvaa tehoa mittapisteiden välissä.



Kuva 12. Vastaanottoantennin suuntakuvion mittauspisteet ja interpoloimalla saatu käyrä.

Kuvasta 12 nähdään että vastaanotettu teho laskee, kun vastaanottokulma kasvaa. Muutetaan y-akseli suhteelliseksi jakamalla kaikki sen arvot tehon maksimiavulla. Näin saaduilla arvoilla voidaan kompensoida suuntakuviosta aiheutuvaa tehonmenetystä. Suhteellisista tehoarvoista muodostettu käyrä näkyy kuvassa 13.



Kuva 13. Vastaanottoantennin vahvistus.

4. TULOKSET

Kaiken edellä määritellyn tiedon pohjalta voidaan määrittää heijastuskertoimelle kaava.

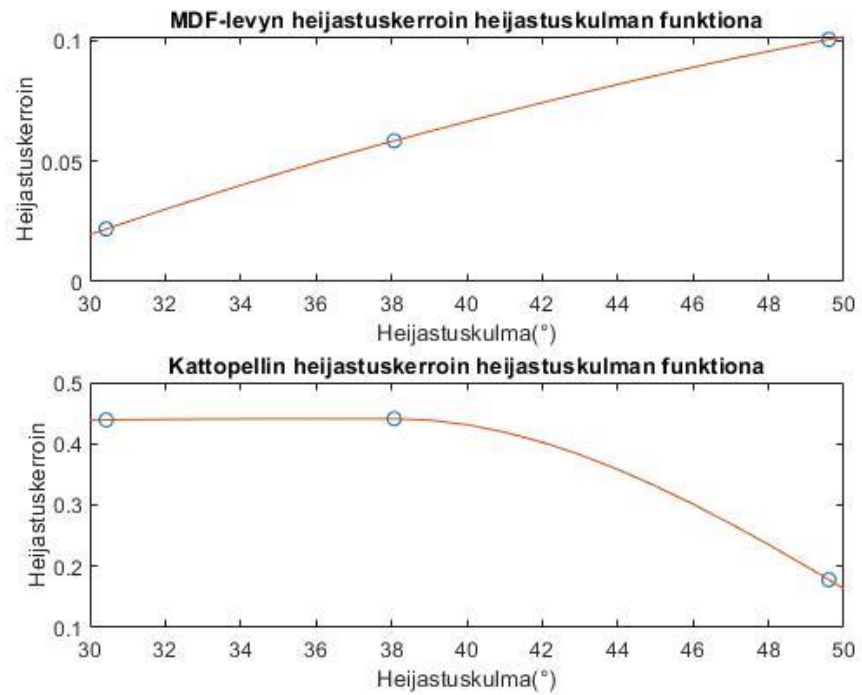
$$\rho = \frac{P'_1}{P_1} = \frac{P_{Rx}}{P_{LOS}(r_{kok}) * G_{Rx}(\theta)} \quad (12)$$

Kaavassa P_{Rx} on heijastuksen mitattu teho watteina, $P_{LOS}(r_{kok})$ on vastaanoton mitattu teho watteina ilman heijastusta etäisyydellä r_{kok} lähetinantennista, ja $G_{Rx}(\theta)$ on skaalauskerroin antennin suuntakulman funktiona, jonka kuvaaja näkyy kuvassa 13.

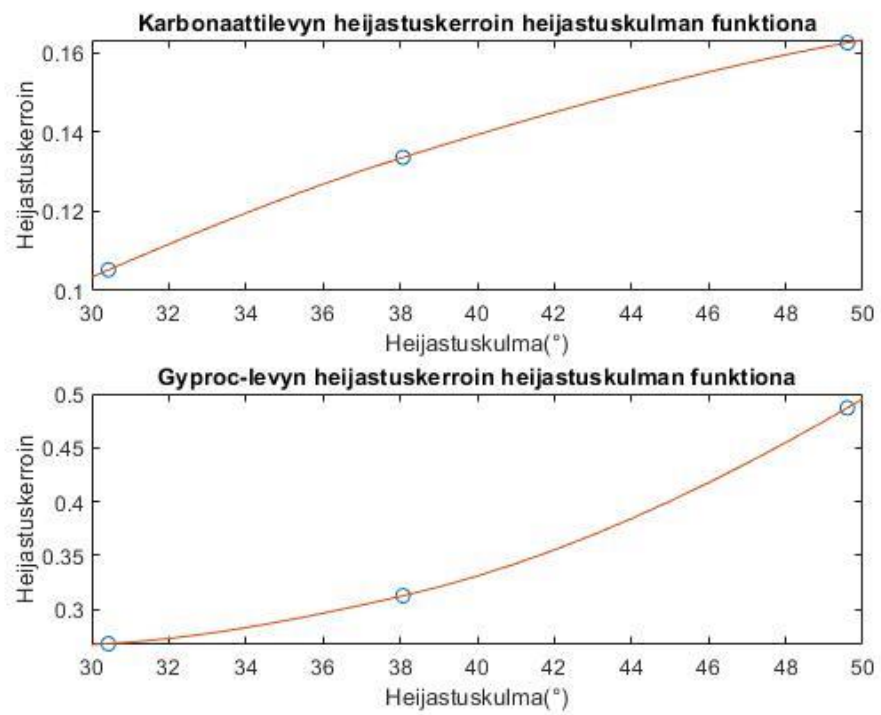
Lasketaan kaavalla (12) MATLAB:issa heijastuskertoimet jokaisen seitsemän vastaanottoantennin tehoarvoilla jokaiselle tutkittavalle materiaalille. Lasku suoritetaan kolmella eri heijastuskulman θ'_1 , saaduilla tehoarvoilla. Näin jokainen tutkittava materiaali saa seitsemän heijastuskertoimen arvoa jokaiselle heijastuskulmalle.

Kappaleen 2.3.1 kuvassa kolme on havainnollistettu signaalin tulokulma θ_1 ja heijastuskulma θ'_1 . Tulokulma on rajapinnan normaalin ja saapuvan signaalin etenemissuunnan välinen kulma. Heijastuskulma on rajapinnan normaalin ja heijastuneen signaalin etenemissuunnan välinen kulma. Samassa kappaleessa käydyn snellin lain mukaan heijastuskulma on yhtä suuri kuin tulokulma, eli signaali heijastuu samassa kulmassa, kuin se saapuu aineiden rajapintaan. Tästä syystä suurin osa signaalin energiasta osuu vain siihen antenniin, joka sattuu olemaan oikeassa paikassa. Laskettuja heijastuskertoimia tarkastellessa huomataan, että kahden tai kolmen antennin tehoarvoilla lasketut heijastuskertoimet ovat selvästi suurempia kuin muiden. Valitaan lopullisiin tuloksiin näiden suurimpien heijastuskertoimien keskiarvo, koska päätellään antennien, joiden tehoarvoilla suurimmat heijastuskertoimet on laskettu, olleen lähimpänä kohtaa, johon suurin osa heijastuneen aallon energiasta on osunut.

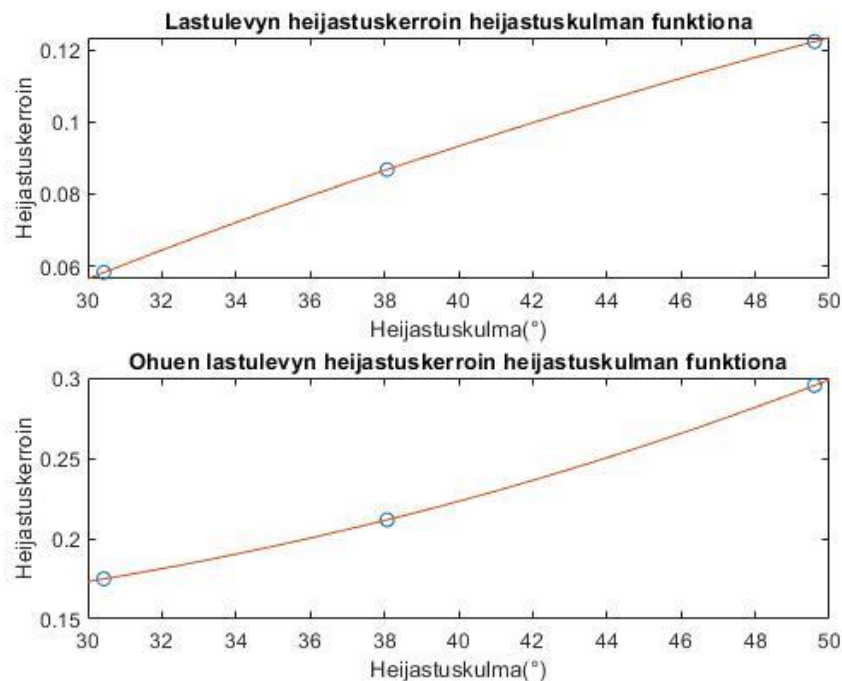
Kolmella eri heijastuskulmalla lasketuista heijastuskertoimista muodostettiin MATLAB:lla interpoloimalla kaikille tutkituille materiaaleille kuvissa 14-17 näkyvät kuvaajat, jotka esittävät materiaalien heijastuskertoimia heijastuskulman funktiona.



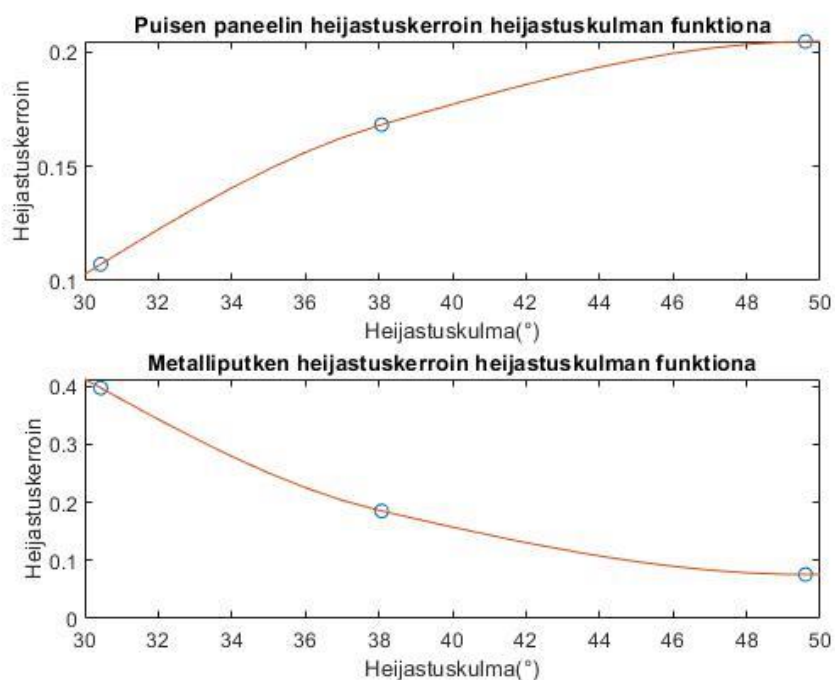
Kuva 14. MDF-levyn ja kattopellin heijastuskertoimet.



Kuva 15. Karbonaattilevyn ja Gyproc-levyn heijastuskertoimet.



Kuva 16. Lastulevyn ja ohuen lastulevyn heijastuskertoimet.



Kuva 17. Puisen paneelin ja metalliputken heijastuskertoimet.

Tuloksia tarkasteltaessa voidaan huomata, että suurin osa materiaaleista noudattavat kappaleessa 2.3 käytyjä heijastuskertoimen kaavoja, joiden mukaan tulokulman tai heijastuskulman kasvaessa heijastuskerroin kasvaa. Kuvan 13 kattopelti ja kuvan 17 metalliputki eivät kuitenkaan noudata tätä kaavaa. Tämä johtuu siitä, että niiden pinnat eivät ole tasaisia, joten signaali heijastuu moniin eri suuntiin. Näiden materiaalien tapauksessa eri heijastuskulmalla tehtyt mittaukset eivät ole verrannollisia toisiinsa.

Tulosten mukaan heijastavin materiaali on Gyproc-levy, jonka heijastuskerroin vaihtelee kuvassa 15 arvojen 0,25 ja 0,5 välillä riippuen heijastuskulmasta. Vähiten heijastava materiaali on tulosten mukaan MDF-levy. Sen heijastuskerroin vaihtelee kuvassa 14 arvojen 0,025 ja 0,1 välillä.

Kuvassa 16 on esitelty lastulevyn ja ohuen lastulevyn heijastuskertoimia. Kuvaajista nähdään, että näiden eri paksuisten materiaalien heijastuskertoimien välinen ero on noin 0,12. Näiden arvojen tulisi olla täysin identtisiä, koska kappaleessa 2.3 käytyjen heijastuskulman kaavojen mukaan heijastuskerroin on riippuvainen vain tulokulmasta ja materiaalin permittiivisyydestä. Tästä voidaan päätellä, että mittauksissa on ollut jonkun verran epätarkkuutta.

5. POHDINTA

Joidenkin antennien tehoarvoilla lasketuista heijastuskertoimista tuli suurempia kuin yksi. Nämä arvot hylättiin, eikä niitä otettu heijastuskertoimien keskiarvoitukseen. Tästä voidaan päätellä, että mittausjärjestelmän ulkopuolelta on täytynyt tulla energiaa vastaanottoon. Tämä oli odotettavissa, sillä tilassa, jossa mittaukset tehtiin, oli toiminnassa paljon lähettäviä antennoja. Toinen mahdollinen selitys heijastuskertoimien suuruudelle on se, ettei mittauksissa otettu huomioon lähetysantennin sivukeiloja. Lähetysantennista tuli jonkun verran energiaa vastaanottoon ilman heijastusta.

Mittauksissa aiheuttaa epätarkkuutta myös se, että lähetinantenni suunnattiin käsin jokaisen mittauksen yhteydessä osoittamaan kohti heijastavaa pintaa. Mittauksissa oletettiin, että antennin pääkeila osuu keskelle heijastavaa pintaa, mistä etäisyys a oli laskettu. Todellisuudessa pääkeila ei osunut keskelle tai joissain tapauksissa se ei saattanut osua pintaan ollenkaan (mahdollisesti metalliputki). On myös hyvin mahdollista, että joissain tapauksissa pääkeila osui pintaan mutta heijastunut keila ei osunut yhteenkään vastaanottoantenneista.

Mittausta voisi parantaa eristämällä mittaustilan kaikista häiriöistä, määrittämällä kaikki dimensioid tarkasti laser-mittarilla, sekä suuntaamalla antennit niin, että voidaan olla täysin varmoja siitä, missä kohdassa antennin pääkeila osuu heijastavaan pintaan. Vastaanottoantenneja tulisi olla enemmän ja pienempien välimatkojen päässä toisistaan.

Tämän työn tuloksena saatuja heijastuskertoimia voidaan hyödyntää langattomia yhteyksiä suunnitellessa. Kun tiedetään mitkä materiaalit heijastavat parhaiten ja mitkä heikommin, voidaan tukiasemat sijoittaa tehokkaasti. Tietoa voitaisiin myös käyttää myös itse tilojen suunnittelussa. Sokkeloisiin tiloihin voitaisiin käyttää heijastavia materiaaleja, jotta signaalit kantaisivat mahdollisimman pitkälle.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin heijastusta erilaisista rakennusmateriaaleista 28 GHz:n taajuudella kolmella eri signaalin tulokulmalla. Tutkimuksen päätavoitteena oli laskea materiaaleille heijastuskertoimet ja muodostaa niistä interpoloimalla kuvaajat, jotka esittävät heijastuskerrointa heijastuskulman funktiona.

Heijastuskertoimet laskettiin mittauksista saatujen lukuarvojen avulla. Mittaukset tehtiin yhden 28 GHz:n lähetinantennin ja seitsemän vastaanottoantennin avulla. Antenneilla mitattiin heijastuneen signaalin tehoa, signaalin tehoa ilman heijastusta eri etäisyyksillä lähetinantennista, sekä tehoa vastaanottoantennin ollessa eri kulmissa signaalin etenemissuuntaan nähden. Heijastuskertoimet laskettiin mittauksista saaduilla arvoilla MATLAB:issa. Heijastuskertoimista ja niiden vastaavista heijastuskulmista muodostettiin MATLAB:in interpolointi skriptillä tavoitteen mukaiset kuvaajat.

Tuloksista ei tullut kovin tarkkoja, koska mittaustila oli häiriöinen ja itse mittausta tehdessä ei oltu kovin tarkkoja. Mittausta voisi parantaa eristämällä mittaustilan häiriöistä ja käyttämällä dimensioiden määrittelyyn tarkkaa lasermittaria, sekä suuntaamalla antennit tarkemmin.

7. LÄHTEET

- [1] Yarali A. (2017) 5G Mobile : From Research and Innovations to Deployment Aspects. URL:
<http://search.ebscohost.com.pc124152.oulu.fi:8080/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1511991&site=ehost-live>.
- [2] Osseiran A. & Monserrat J.F. & Marsch P. (2016) 5G Mobile and Wireless Communications Technology. Cambridge University Press, 440 s.
- [3] Hubregt J. Visser. (2012) Antenna theory and applications. GB: Wiley
- [4] Vuohtoniemi R. (2018) Radiotekniikan perusteet, luennot 3 ja 4. URL:
https://optima.oulu.fi/learning/id76/bin/doc_show?id=342075&ws=87368
- [5] Sevgi L. (2017). A practical guide to EMC engineering : Levent sevgi. Boston: Artech House.
- [6] Vuohtoniemi R. (2018) Radiotekniikan perusteet, luento 13. URL:
https://optima.oulu.fi/learning/id76/bin/doc_show?id=349693&ws=87368